

ESTUDO DA USINABILIDADE NO FRESAMENTO DA LIGA DE TITÂNIO Ti-6Al-4V PRODUZIDA POR MANUFATURA ADITIVA

Altair Martins Júnior

Fábio de Oliveira Campos

Coordenação de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca—RJ, Nova Iguaçu, Brazil

altair.mjuni90@gmail.com

fabio.campos@cefet-rj.br

Resumo. A liga de titânio Ti6Al4V é um dos materiais mais utilizados na fabricação de implantes biomédicos devido principalmente às suas propriedades mecânicas como a resistência mecânica e também pela alta resistência a corrosão e a boa biocompatibilidade. Usualmente, esses implantes são fabricados por processos convencionais como fundição e usinagem. Entretanto, com o surgimento recente de processos de manufatura aditiva que conseguem fabricar peças metálicas com 100% de densidade, estes processos começaram a ser estudados para esta aplicação. Um desses processos é a fusão seletiva a laser (SLM – selective laser melting). Porém, devido à baixa qualidade da superfície fabricada nesses processos, operações de usinagem ainda são necessárias para fazer o acabamento dessas peças. A operação de SLM consiste na fusão e rápido resfriamento de camadas de pó metálico uma após a outra até completar a geometria da peça. Devido ao rápido resfriamento, as propriedades do material fabricado por SLM diferem das propriedades do material fabricado por processos convencionais, pois há modificação na sua microestrutura. Dessa forma, torna-se essencial o estudo da usinabilidade deste material com novas propriedades para otimizar o acabamento destes implantes. Assim, o presente trabalho tem como objetivo o estudo da usinabilidade da liga de titânio Ti6Al4V produzida por SLM no fresamento analisando a força de corte, a rugosidade de superfície, a formação de rebarba e os cavacos gerados durante o processo. Para o estudo foi realizado um planejamento de experimentos com dois fatores, avanço por dente e profundidade de corte, e três níveis.

Palavras chave: Usinabilidade, Titânio, Manufatura Aditiva, Fresamento

1. INTRODUÇÃO

O titânio puro é o material ideal para ser utilizado na fabricação de próteses e implantes, sejam ortopédicos ou dentários, devido a propriedades como alta resistência à corrosão e biocompatibilidade (Kikuchi, 2009). Entretanto, o titânio puro não apresenta resistência mecânica suficiente para aplicações onde altas cargas são necessárias, sendo necessário o uso de ligas de titânio (Traini et al., 2008). A liga de titânio grau 5, com alumínio e vanádio (Ti-6Al-4V), apresenta uma significativa melhora nas propriedades de resistência mecânica em relação ao titânio puro, porém mantendo de forma suficiente as propriedades que fazem o material ser utilizado na fabricação dos implantes. Assim, a liga de titânio Ti-6Al-4V é um dos materiais mais usados nessa indústria (Rack e Qazi, 2001; Niinomi, 2008).

Diversos processos de fabricação são usados na fabricação de implantes. Fundição seguida de usinagem, fundição seguida de processos de conformação mecânica como laminação e forjamento são alguns exemplos. Processos de usinagem como fresamento, torneamento e furação são amplamente utilizados por terem a capacidade de entregar baixas rugosidades de superfície e boa precisão dimensional.

Nos últimos anos, com o grande avanço no desenvolvimento tecnológico de processos de manufatura aditiva (AM), especialmente nos que possibilitam o uso de materiais metálicos, o processo de *Selective Laser Melting* (SLM) tem sido estudado para possível aplicação na fabricação de implantes (Kruth et al., 2007). A fabricação por manufatura aditiva apresenta grandes vantagens sobre processos de usinagem, baseados na manufatura subtrativa, por diminuir as perdas de material, possibilitarem a fabricação de geometrias de extrema complexidade e possuírem altos níveis de automação por natureza, o que tem se mostrado essencial no momento em que a Indústria 4.0 tem sido tão discutida. Entretanto, a principal desvantagem da manufatura aditiva frente à usinagem é que ela ainda produz superfícies com acabamentos piores, sendo necessário pós-processamentos com operações de usinagem para fazer o acabamento da peça (Campos, 2016; Pesach, 2018).

Como os processos de AM, em especial o SLM, produzem alterações nas propriedades dos materiais quando comparadas às do material produzido de forma convencional, se torna essencial conhecer como essas propriedades podem influenciar na sua usinabilidade (Rotella, 2018). Na operação de SLM, a peça é fabricada através da fusão e rápido resfriamento de camadas de pó metálico de forma contínua até a peça ser fabricada completamente. A fusão do material seguida de um resfriamento rápido faz com que a microestrutura do material seja alterada, influenciando suas propriedades e, conseqüentemente, sua usinabilidade (Polishetty, 2017).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi analisar a usinabilidade no fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V produzida por *Selective Laser Melting* considerando os critérios de força de corte, rugosidade de superfície e morfologia do cavaco.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A amostra que foi submetida à operação de fresamento possui geometria simples conforme a Fig. 1a. Ela foi fornecida pelo Biofabris - Instituto Nacional de Ciência & Tecnologia em Biofabricação, laboratório da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Seu material é uma liga de titânio, Ti-6Al-4V, e foi fabricada pelo processo de manufatura aditiva *Selective Laser Melting*, onde os pós utilizados na fabricação possuem morfologia esférica e diâmetro variável conforme Fig. 1b. A máquina utilizada é da empresa EOS modelo M 270. Para a fabricação da peça analisada nesse trabalho, foi utilizado laser a uma potência de 170 W, com velocidade de escaneamento de 1250 mm/s e espaçamento de 0,1 mm. O parâmetro de construção da peça ficou definido em 0,03mm de espessura por camada.

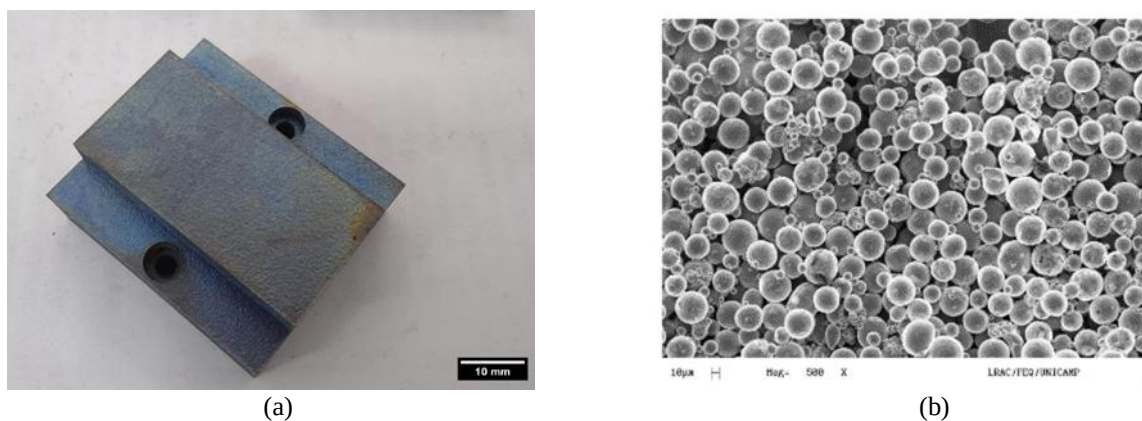


Figura 1. a) Imagem da amostra de Ti-6Al-4V fabricada por manufatura aditiva; b) imagem em microscópio dos pós de Ti-6Al-4V utilizados no SLM (Campos, 2017).

A fresadora utilizada para o trabalho foi o modelo Diplomat FVF 2000, de fabricação da empresa brasileira DEB'MAQ (Fig. 2a). A ferramenta utilizada para as operações que serão analisadas é uma fresa de metal duro para acabamento fabricada pela empresa DORMER, como mostrado na Fig. 2. Foram utilizadas duas unidades, uma para cada etapa, e ambas possuem um diâmetro de 3 mm e duas arestas de corte cada.

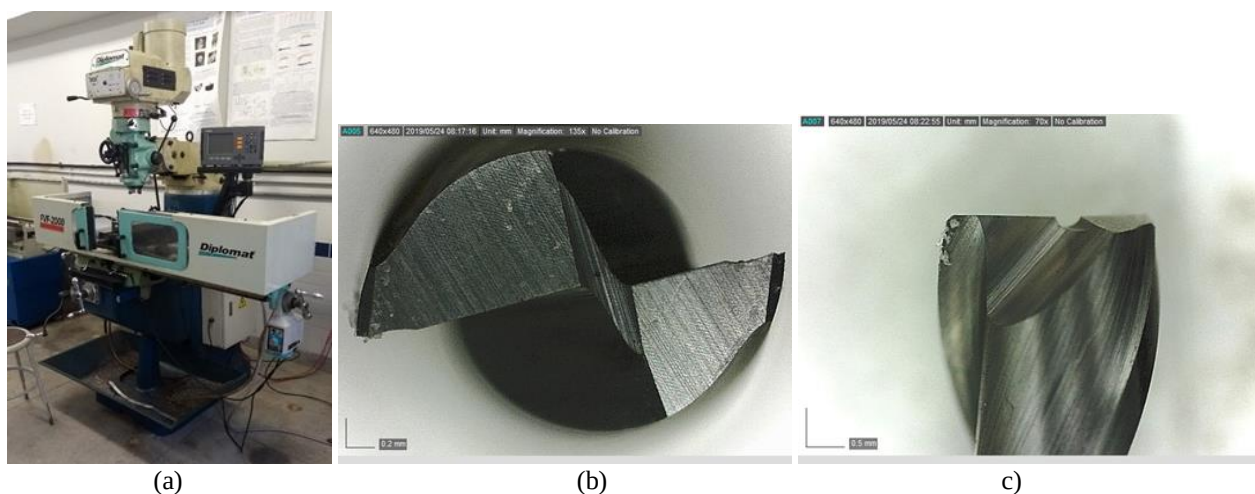


Fig. 2. a) Fresadora utilizada; b) e c) Ferramenta nova utilizada nas operações de fresamento.

2.1 Planejamento de experimentos

Para o planejamento de experimentos, foi realizado um planejamento fatorial completo 3^2 , utilizando como fatores o avanço por dente f_z e a profundidade de corte b . A escolha para esses parâmetros se deve ao fato de que o avanço é de extrema importância, tendo influência direta nas forças de corte, rugosidade e rebarba, e a profundidade de corte, além de

influenciar na força, pode ter impacto na formação de rebarba. Assim, são dois parâmetros essenciais, além de estarem ligados à quantidade de material removido e, por consequência, ao tempo de usinagem e produtividade. A Tab. 1 apresenta os valores dos três níveis para cada fator. Os valores foram escolhidos levando em consideração outros estudos feitos sobre a usinabilidade de ligas de titânio.

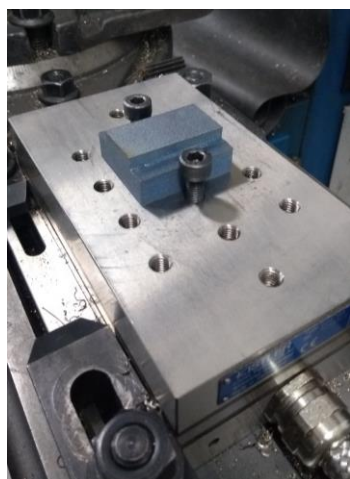
Tabela 1. Parâmetros de cada operação

b (mm)	0,6	+1 -1	+1 0	+1 +1
	0,4	0 -1	0 0	0 +1
	0,2	-1 -1	-1 0	-1 +1
		40	80	150
		V_f (mm/min)		

Inicialmente, foi realizada a planificação da peça e em seguida as duas etapas de fresamento. Para a planificação foram utilizadas pastilhas de metal duro a uma rotação de 1040 rpm e, em função da limitação de espaço para fixação da peça, foram feitos passes manuais pelo eixo x da máquina até que a peça estivesse totalmente plana e pronta para as operações de análise. Os experimentos consistiram na abertura de canais por fresamento em cheio. Para todas as operações deste trabalho não foi usado nenhum fluido de corte. A rotação da ferramenta utilizada foi de 3800 rpm ($V_c = 35$ m/min).

2.2 Equipamentos

Durante as operações de fresamento, foram adquiridas as forças de corte por meio de um dinamômetro instalado na fresadora. O equipamento ficou acoplado à mesa e a peça fixada por dois parafusos no dinamômetro, conforme Fig. 3a. O dinamômetro utilizado foi o da fabricante Kistler, modelo 925 7BA, conectado a um amplificador também da Kistler (Fig. 3b) à uma placa de aquisição de dados da National Instruments (Fig. 3c). Esses equipamentos permitiram que as forças de corte nos eixos x, y e z pudessem ser adquiridas e plotadas graficamente na tela do computador. Seu funcionamento consiste em converter a tensão em Volts relativa as forças para Newton, a unidade de medida de força no Sistema Internacional. A taxa de conversão utilizada inicialmente foi de 5 mV/N, porém com o aumento das forças passou-se a utilizar 2,5 mV/N para que todo o sinal fosse captado. A taxa de aquisição utilizada foi de 1 kHz. Cada uma das 9 operações de cada etapa foi registrada e em seguida trabalhada no programa MATLAB para a análise das forças.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. a) Fixação da amostra no dinamômetro; b) Amplificador; c) Placa de aquisição

A análise de rugosidade foi realizada no Laboratório de Microusinagem Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRJ, utilizando um perfilômetro da empresa Taylor Hobson, modelo Talysurf 50 (Fig. 4a). O equipamento possui medição vertical máxima de 1 mm com resolução de 16 nm e um espaçamento horizontal máximo de 50 mm e com aquisição de dados de 0,5 μ m. Seu apalpador possui um ângulo de 90° com um diamante de 2 μ m de diâmetro (Fig. 4b).

Para a análise da rugosidade, é necessário filtrar o sinal adquirido pelo equipamento com o objetivo de retirar os sinais advindos da geometria própria da peça. Para isso foi definido um *cut-off* de 0,08 mm com base na norma ISO 4288-1996. O procedimento de medição consistiu em 3 análises de cada canal onde foi realizado o fresamento, para cada lado da peça, totalizando assim 6 análises para cada combinação de parâmetros.

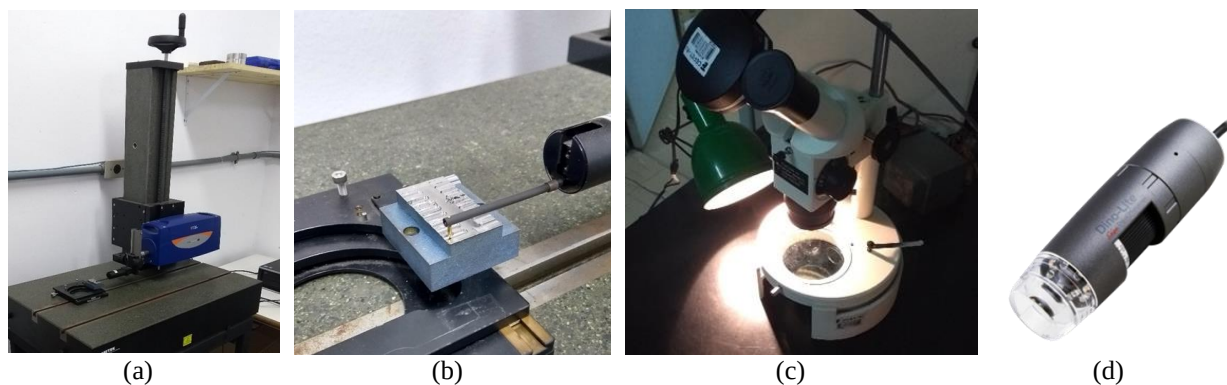


Figura 4. a) Perfilômetro; b) Apalpador; c) Microscópio óptico; d) Câmera USB.

Para cada réplica, foi utilizada uma ferramenta nova. Ao final das 9 operações de corte a que cada uma foi submetida, foram guardadas para posterior análise em laboratório. Os cavacos foram recolhidos após cada operação e guardados em pequenos envelopes para posterior análise em laboratório. As análises dos cavacos, das rebarbas e das ferramentas foram realizadas no LAMAT do CEFET-RJ, com a utilização de um microscópio da empresa Metripex/PZO-Labimex e uma câmera da empresa Olympus Soft Imaging Solutions, modelo UC 50 (Fig. 4c); e no Laboratório de Microusinagem da COPPE/UFRJ com o uso de uma câmera portátil com lente microscópica USB AM3715TB Dino-Lite Edge (Fig. 4d).

As ferramentas e os cavacos foram fixados à base do microscópio e foi utilizado uma lente de 0,63. Foram capturadas imagens das duas ferramentas utilizadas e as imagens de uma ferramenta nova, de mesmas especificações. Os cavacos analisados foram os das operações -1 -1, 0 0 e +1 +1, e foram capturadas imagens dos cavacos em geral para análise qualitativa.

Para a caracterização de um material, é importante ter conhecimento de sua microestrutura. Como não foi possível realizar essas medições neste trabalho, para a caracterização será usado o trabalho de Campos (2017) que realizou estudo na mesma peça deste trabalho, de liga de titânio Ti-6Al-4V fabricada por SLM. Pela imagem da Fig. 5, pode-se observar a formação de martensita acicular α' . Esse tipo de microestrutura ocorre em função do rápido resfriamento do material após o aquecimento pela passagem do laser, é importante ressaltar que a peça do estudo não apresentou nenhum dos defeitos comuns provenientes de fabricação por SLM e nem porosidade excessiva, confirmando que o resultado da fabricação foi uma peça totalmente densa. O mesmo trabalho também realizou a medição de dureza Vickers do material. Após cinco medições utilizando cargas de 30 kgf por ciclos de 20 s, uma dureza de 39,2 HV foi encontrada.

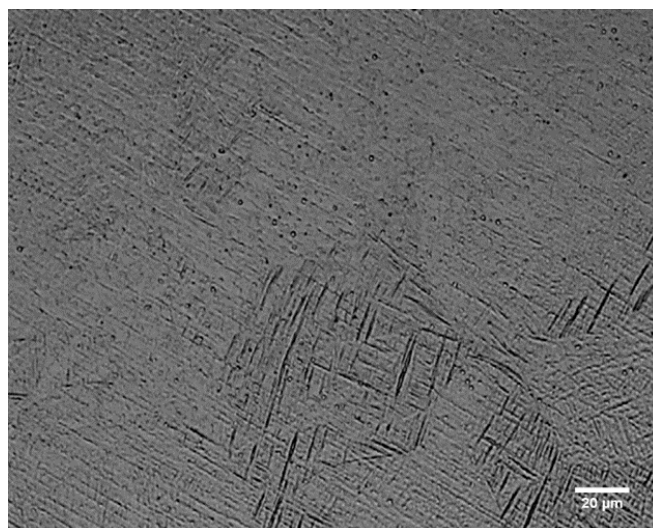


Figura 5. Microestrutura de uma liga de titânio Ti-6Al-4V fabricada por SLM.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os sinais das forças de corte experimentais foram adquiridos sem nenhum tratamento. Assim, antes de realizar análise estatística dos dados, os sinais foram analisados para verificar a necessidade de filtragem. Para isso, os sinais foram

analisados no domínio da frequência para identificação dos picos de amplitude. De acordo com a rotação utilizada na máquina (3800 rpm), espera-se picos de amplitude do sinal na frequência principal de 63,33 Hz e picos secundários em múltiplos desse valor. Para a análise no domínio da frequência, foi feita uma Transformada de Fourier Rápida (FFT) e a análise dos picos pode ser vista na Fig. 6, confirmando as frequências apontadas, não sendo identificado alto nível de ruído de outras frequências.

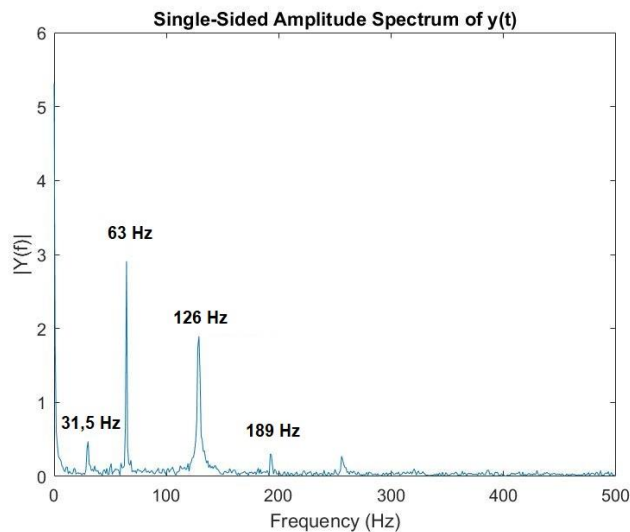


Figura 6. Gráfico resultante da FFT, onde se pode verificar as frequências principais do sinal de forças.

. Para análise das forças, a força em Z foi desprezada, pois sabe-se que ela é muito menor que as forças em X e Y. Para cada experimento, foi calculada a média da força de corte resultante máxima para cada rotação considerando 40 rotações. As Fig. 7 e Fig. 8 apresentam a influência da variação do avanço por dente e da profundidade de corte nos valores das forças de corte. As barras de erro correspondem a $\pm 1.96\sigma$, ou seja, um intervalo de confiança de 95%.

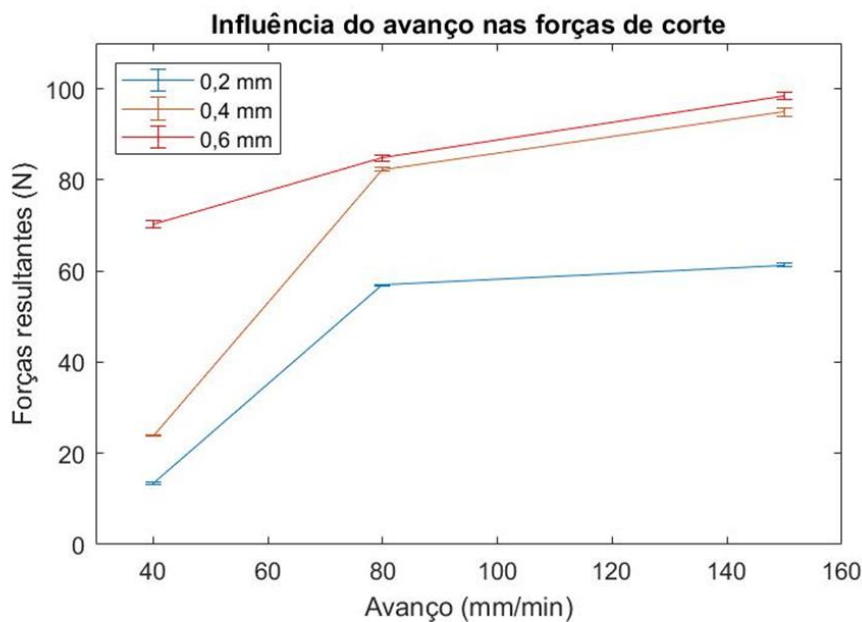


Figura 7. Gráfico representando a influência do avanço na usinagem do Ti-6Al-4V fabricado por SLM.

Os resultados foram conforme esperados, sendo encontrada uma correlação direta entre o aumento do avanço por dente e da profundidade com os valores da força de corte já que tanto o avanço por dente como a profundidade de corte aumentam a área de contato entre a ferramenta e o material, aumentando, assim, a quantidade de material removido e a força necessária para remoção.

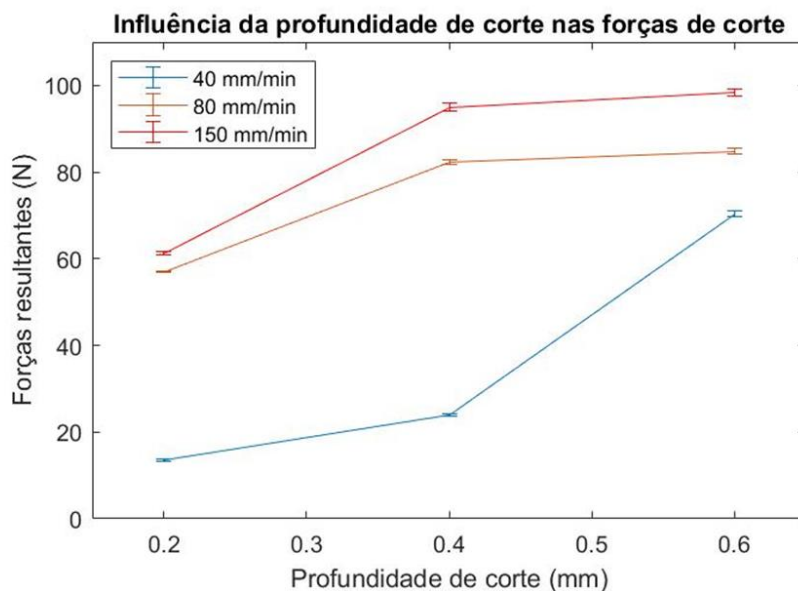


Figura 8. Gráfico representando a influência da profundidade de corte na usinagem do Ti-6Al-4V fabricado por SLM.

Os resultados das medições de rugosidade são apresentados nas Fig. 9 e Fig. 10 para um intervalo de confiança de 95%. Eles indicam um aumento da rugosidade com o aumento do avanço e da profundidade. O avanço influencia a rugosidade, pois ele determina o tamanho dos sulcos deixados pela ferramenta na superfície da peça. Já a profundidade pode influenciar através do desgaste imposto na aresta de corte.

A Fig. 11 apresenta imagens dos canais usinados adquiridas com uma câmera digital. O estudo da formação de rebarba é um desafio nas pesquisas de usinabilidade, pois é característica de difícil medição quantitativa. Para o presente estudo, optou-se pela análise qualitativa, através de imagens dos canais. Os experimentos com maior formação de rebarba foram os de menor profundidade ($b = 0,2$ mm), mas maiores velocidades de avanço (80 e 150 mm/min), como mostra a Fig. 11a. Como as rebarbas são formadas por material que foi deformado plasticamente, mas o corte não foi completado para que ele fosse arrancado, uma possível explicação para esse resultado pode ser o baixo volume de material removido, já que foi com a menor profundidade.

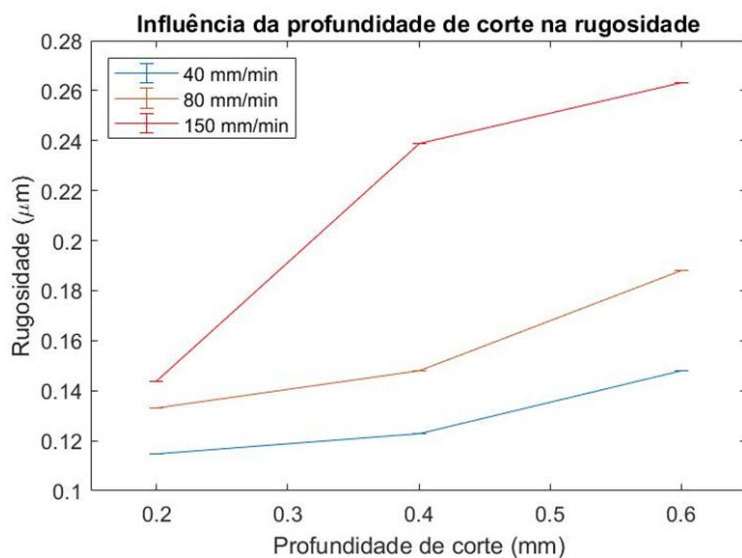


Figura 9. Influência da profundidade de corte na rugosidade do acabamento de superfície.

Os canais usinados também foram analisados e podem ser observados dois comportamentos distintos, dependendo dos parâmetros de corte: para o menor avanço, pode ser observado em alguns canais o que é chamado de *back cutting*, ou seja, quando as arestas de corte retiram material quando estão retornando, deixando marcas na superfície em ambas as direções; para avanços maiores, as marcas encontradas nos canais foram como esperado para o fresamento. As Fig. 11b e Fig. 11c mostram esses resultados, respectivamente. O *back cutting* ocorre quando o avanço é pequeno em relação ao

raio de aresta e a aresta de corte não corta material, apenas deforma plasticamente, fazendo com que a aresta corte quando passa na direção oposta.

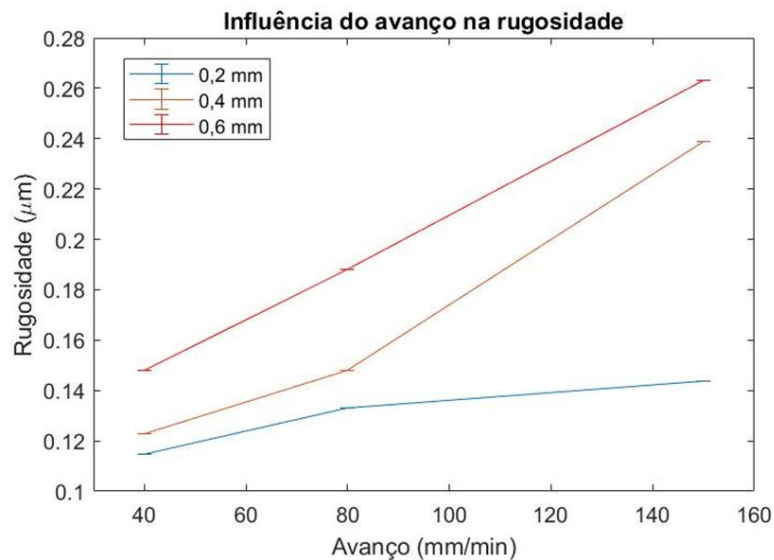


Figura 10. Influência da velocidade de avanço na rugosidade do acabamento de superfície

Os cavacos coletados também foram analisados qualitativamente. De forma geral, pode ser observado que para parâmetros de corte menores, houve menos geração de cavaco, indicando que, de fato, pode ter havido algum volume de material que foi apenas deformado plasticamente e não cortado. Para parâmetros de corte maiores, os cavacos gerados foram mais abundantes e com geometria mais uniforme. Os cavacos gerados foram curtos, conforme esperado devido às elevadas propriedades de dureza do material. Amostras dos cavacos são mostrados na Fig. 12.

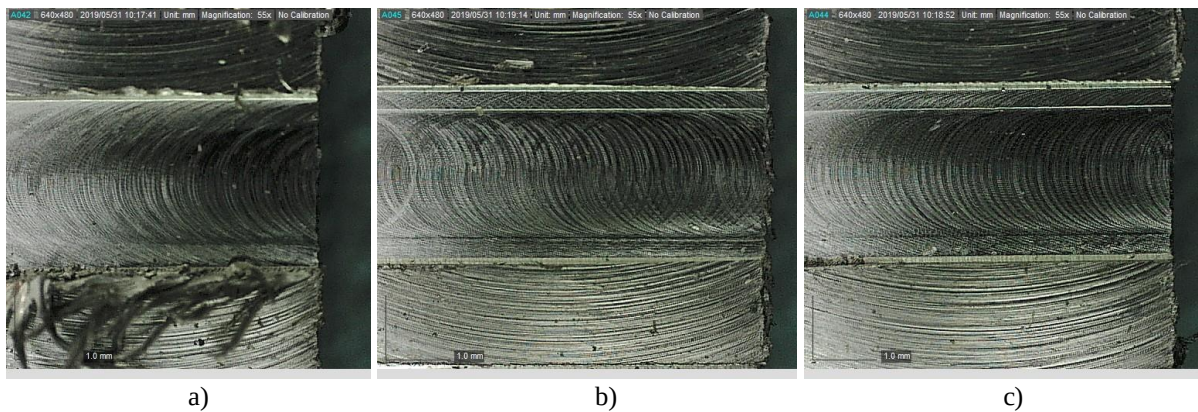


Figura 11. Imagens ópticas dos canais usinados: a) $b = 0,2 \text{ mm}$ e $V_f = 80 \text{ mm/min}$; b) $b = 0,2 \text{ mm}$ e $V_f = 40 \text{ mm/min}$; c) $b = 0,4 \text{ mm}$ e $V_f = 80 \text{ mm/min}$.

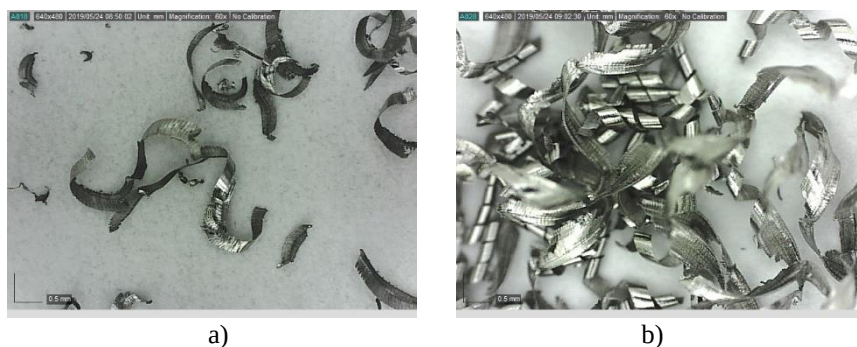


Figura 12. Imagens ópticas dos cavacos: a) $b = 0,2 \text{ mm}$ e $V_f = 40 \text{ mm/min}$; b) $b = 0,4 \text{ mm}$ e $V_f = 150 \text{ mm/min}$.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou testes de usinagem em uma peça de liga de titânio Ti-6Al-4V, fabricada pelo processo de manufatura aditiva. Foram variadas as profundidades de corte e as velocidades de avanço, com o objetivo de verificar como seria o comportamento dessa liga, fabricada por AM, quando submetida a um dos processos de pós-processamento comuns a essa tecnologia, o fresamento. Foi possível elencar as seguintes conclusões:

- As forças apresentam maiores variações quando em menores velocidades de avanço e profundidades de corte.
- Como é esperado em uma liga de titânio como a Ti-6Al-4V, a rugosidade e a qualidade do acabamento de superfície, dependem de menores velocidades e profundidades, evitando muita geração de atrito e calor.
- Houve um desafio com relação a formação dos cavacos nas operações, que não apresentaram morfologia e tamanhos homogêneos.
- Pela formação de rebarbas e pelas imagens dos canais, observou-se o desafio em se usinar o titânio em função de seu baixo módulo de elasticidade.

Como continuação do trabalho, pretende-se realizar os mesmos experimentos em uma amostra da liga Ti-6Al-4V para comparação da usinabilidade. Este trabalho é uma primeira etapa visando a comparação da usinabilidade da liga produzida por manufatura aditiva com o mesmo material produzido de forma convencional, sendo este a principal indicação de trabalho futuro. Pretende-se, ainda, realizar as mesmas análises utilizando avanços por dente pequenos, pois há trabalhos que indicam uma relação entre aumento de resistência e diminuição da força de corte, o que contraria resultados esperados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Campinas, Universidade Federal do Rio de Janeiro e ao campus Maracanã do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – RJ pela disponibilidade de seus materiais, equipamentos e laboratórios.

6. REFERÊNCIAS

- CAMPOS, F. O., An experimental study on micromilling of titanium alloy Ti-6Al-4V, XX Colóquio de Usinagem. Uberlândia, 2016.
- CAMPOS, F. O., Micromilling of titanium alloys: a comparison between workpieces produced by casting, ECAP and 3D printing (SLM), Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- KIKUCHI, M. “The use of cutting temperature to evaluate the machinability of titanium alloys”, Acta Biomaterialia, v. 5, n. 2, pp. 770 – 775, 2009.
- KRUTH, J. P., LEVY, G., KLOCKE, F., CHILDS, T. H.C., “Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 56, n. 2, pp. 730 – 759, 2007.
- NIINOMI, M. “Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications”, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, v. 1, n. 1, pp. 30 – 42, 2008. ISSN: 1751-6161.
- PESACH, A. et al., Texture analysis of additively manufactured Ti-6Al-4V using neutron diffraction, Additive Manufacturing, v. 23, p. 394 – 401, 2018.
- POLISHETTY, A., SHUNMUGAVEL, M., GOLDBERG, M., LITTLEFAIR, G., SINGH, R. K., Cutting Force and Surface Finish Analysis of Machining Additive Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V, Procedia Manufacturing, v. 7, p. 284 – 289, 2017.
- RACK, H., QAZI, J. “Titanium alloys for biomedical applications”, Materials Science and Engineering: C, v. 26, n. 8, pp. 1269 – 1277, 2006.
- ROTELLA, G., IMBROGNO, S., CANDAMANO, S., UMBRELLO, D., Surface integrity of machined additively manufactured Ti alloys, Journal of Materials Processing Tech., v. 259, p. 180 – 185, 2018.
- TRAINI, T., MANGANO, C., SAMMONS, R. L., MANGANO, F., MACCHI, A., PIATTELLI, A., “Direct laser metal sintering as a new approach to fabrication of an isoelastic functionally graded material for manufacture of porous titanium dental implants”, Dental Materials, v. 24, n. 11, pp. 1525 – 1533, 2008.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

A study of the Milling Machinability of the Titanium Alloy Ti-6Al-4V Produced by Additive Manufacturing

Altair Martins Júnior

Fábio de Oliveira Campos

Coordenação de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca—RJ, Nova Iguaçu, Brazil

altair.mjuni90@gmail.com

fabio.campos@cefet-rj.br

Abstract. *Titanium alloy Ti6Al4V is one of the most used materials When manufacturing biomedical implants, especially because of its mechanical properties as mechanical resistance and also its high corrosion resistance and biocompatibility. Usually, these implants are manufactured by conventional processes as casting and machining. However, with recent development of additive manufacturing processes that can produce metallic parts with 100% density, these processes started to be studied to be used for this application. One of these processes is the selective laser melting (SLM). However, due to the low surface finishing produced by these operations, machining procedures are still required for finishing these parts. The SLM process consists on tn melting and quick cooling of metallic power beds one after the Other until the part geometry is complete. Due to rapid cooling, mechanical properties of the material differ from the same material produced by conventional methods as there are modifications in its microstructure. Hence, it is essential to study the machinability of this material with new properties in order to optimize the finishing of these implants. Therefore, the present work aims to study the milling machinability of titanium alloy Ti6Al4V produced by SLM by analyzing the cutting forces, surface roughness, burr formation and chips morphology. For the study, it was carried out a design of experiments with two factors, feed per tooth and axial depth of cut, and three levels.*

Keywords: *machinability, titanium, additive manufacturing, milling*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.